



Abandon des exploitations souterraines CdF Méthodes géophysiques appliquées à la recherche d'anciens travaux miniers

Yves Paquette

► To cite this version:

Yves Paquette. Abandon des exploitations souterraines CdF Méthodes géophysiques appliquées à la recherche d'anciens travaux miniers. Journée technique CdF, Jun 1996, Saint-Etienne, France. pp.59-99. ineris-00971973

HAL Id: ineris-00971973

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00971973>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Abandon des exploitations souterraines CdF

Méthodes géophysiques appliquées à la recherche d'anciens travaux miniers

Y. PAQUETTE

INERIS

1. Introduction

Les risques potentiels d'instabilité induits par les ouvrages souterrains abandonnés constituent un héritage du passé dont il faut tenir compte sur le plan de la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans et à la périphérie des zones urbanisées et industrialisées.

La détection des vides miniers, proches de la surface et susceptibles d'évoluer plus ou moins rapidement vers le fontis, représente un élément essentiel des investigations géotechniques à mettre en oeuvre dans les régions sous-minées.

Si la campagne de sondages est la méthodologie la plus répandue et bien souvent la plus fiable, la prospection par des méthodes géophysiques simples, rapides et non destructives, peut parfois apporter des informations très importantes sur la localisation et l'état de vieux travaux miniers superficiels. Elle peut également guider le choix de l'implantation des sondages.

La présente étude bibliographique a consisté à inventorier et à comparer les meilleures techniques existant actuellement dans ce domaine et à tester certaines d'entre elles sur site.

Compte tenu de l'objectif, les méthodes qui peuvent être retenues in fine sont :

- soit des techniques classiques qui peuvent être adaptées au sujet :
 - la microgravimétrie,
 - l'électromagnétisme sol à émetteur mobile,
 - le panneau électrique,
- soit des techniques a priori plus spécialisées ou plus récentes :
 - le radar géologique ou radar de surface,
 - la méthode magnétique,
 - les techniques de sismique haute-résolution,
 - la thermographie infrarouge sol ou aéroportée.

2. Principales méthodes applicables à la recherche de vides miniers

Microgravimétrie

Cette technique a pour objet d'effectuer à la surface du sol des mesures très précises relatives de l'attraction du champ de la pesanteur à l'aide d'un microgravimètre. Ces mesures sont en relation directe avec les variations globales de masse existant dans le sous-sol. Cette technique est donc a priori la plus appropriée à la détection de vides souterrains. L'interprétation d'un vide, fontis ou d'une zone déconsolidée, s'effectue à partir de tout déficit local de masse («anomalie négative») qui engendre une diminution ponctuelle de l'anomalie régionale.

La diminution de la gravité relative est proportionnelle au volume de la cavité sous la surface du sol. Ce phénomène semble accentué par l'augmentation des vides au sein du massif altéré et/ou fissuré à l'aplomb de la cloche de fontis. Une cavité développée se traduira ainsi par une **anomalie "pointue"** dite de haute fréquence.

Avantages

La microgravimétrie est une technique utilisée depuis de nombreuses années, pour la détection des vides, avec des résultats satisfaisants. En cas de vide suffisamment développé et proche de la surface (< 15-20 m), la méthode gravimétrique peut permettre de lever toute ambiguïté sur l'existence et la position d'une cavité minière avec une bonne précision. Il est possible également de prévoir, à partir de mesures ponctuelles et répétées dans le temps, la progression des cavités vers la surface (montée de voûte).

Inconvénients

Il s'agit d'une méthode géophysique qui peut devenir relativement onéreuse lorsqu'il faut étudier une vaste surface avec un maillage suffisamment dense. Sa mise en oeuvre est par ailleurs délicate et l'interprétation complexe. Elle nécessite des mesures topographiques complémentaires précises et de nombreuses corrections. En milieu urbain et industriel, la microgravimétrie est très sensible aux vibrations et aux bruits de fond de l'environnement. La précision des résultats peut être influencée par la forme des cavités ou perturbée par des effets de masse latéraux (gros piliers, zones effondrées).

Electromagnétisme

Cette technique d'investigation légère permet de mesurer la conductivité apparente du sol en millimohs.mètres à l'aide d'un courant artificiel périodique d'origine proche, injecté dans le sol par induction. L'appareil portatif (type EM31 ou EM34) n'a aucun contact avec le sol. Les bobines émettrices et réceptrices sont montées à chaque extrémité d'une barre portative longue de 3,7 m. En présence d'un milieu conducteur, le champ électromagnétique primaire engendre un nouveau champ électromagnétique induit ou secondaire. Sous certaines hypothèses, le rapport des amplitudes des champs magnétiques secondaires et primaires définit une conductivité apparente qui rend compte des propriétés électriques du milieu. La mesure de la conductivité s'effectue de manière continue quand l'opérateur se déplace et permet de dresser point par point une carte d'isorésistivité de la zone prospectée. On réalise en pratique les mesures en un même point suivant 2 orientations perpendiculaires du dispositif d'émission-réception, afin d'évaluer l'hétérogénéité des terrains.

Avantages

L'électromagnétisme est une méthode légère et peu coûteuse qui permet de couvrir rapidement un site sur toute sa superficie. Elle se révèle pratique pour détecter des anomalies présentant un bon contraste de conductivité et situées à proximité immédiate de la surface (10 m maximum en fonction du type d'appareillage utilisé). Cette méthode permet de détecter tous les objets métalliques enfouis jusqu'à une profondeur d'environ 6 m.

Inconvénients

Les mesures réalisées avec cette technique tendent à engendrer, plus ou moins arbitrairement, des anomalies orientées perpendiculairement à la direction de l'émetteur-récepteur. La profondeur d'investigation est limitée (10 m maximum) et l'interprétation du type d'anomalie doit pratiquement être confirmée par d'autres méthodes géophysiques. Les phénomènes météorologiques peuvent perturber les mesures. Enfin, son emploi reste quasiment interdit en milieu urbain du fait du parasitage électromagnétique intense existant dans cet environnement.

Thermographie infrarouge

La mesure de l'émission infrarouge naturelle d'une surface de terrain dépend de la température réelle de la surface étudiée, fonction de la nature du terrain (conductivité), ainsi que des caractéristiques superficielles de cette surface (émissivité).

Dans l'entourage d'une zone déconsolidée à l'aplomb d'un vide minier, l'inertie thermique des terrains encaissants a tendance à être plus faible que dans les parties massives et la **température restituée diminue**. La faible épaisseur de voûte et l'augmentation des vides réduisent le stockage de l'énergie thermique dans la journée et sa restitution pendant la nuit, d'où la possibilité de détecter cette anomalie thermique. Ce phénomène est plus accentué lorsqu'il ne reste plus en surface qu'un horizon d'altération superficiel, laissant présager que le risque d'effondrement à court terme est élevé.

Avantages

La thermographie infrarouge au sol ou aéroportée fournit une carte d'intensité très fiable du rayonnement IR de la surface d'un site. La technique est simple et rapide. Les résultats sont probants lorsque les vides recherchés se situent à proximité immédiate de la surface. Cette méthode se révèle alors très utile pour préciser le facteur de risque à court terme.

Inconvénients

La mise en oeuvre de cette méthode est limitée à des créneaux horaires particuliers (fin de nuit) et doit être réalisée par temps calme. La profondeur d'investigation est très faible (quelques mètres).

Panneau électrique

La méthode du panneau électrique ou panneau de résistivité est une méthode dérivée des techniques de sondage électrique mises au point par Schlumberger où la résistivité apparente des terrains est mesurée à l'aide d'un dispositif à 4 électrodes. Deux électrodes externes A et B servent à injecter dans le sol un courant électrique, deux électrodes M et N mesurent la différence de potentiel résultante qui permet de calculer la valeur de la résistance électrique du volume de terrain intéressé.

La méthode du panneau électrique consiste à injecter un courant électrique I à partir de 2 électrodes A et B et à mesurer le potentiel résultant ΔV sur une série d'électrodes MN disposées le long d'une ligne de mesure. La ligne de mesure peut être composée de 12 à 48 électrodes. Le point A constitue l'électrode de référence, placée «à l'infini», à une distance de l'ordre de 3 fois la longueur de la ligne de mesure, perpendiculairement à celle-ci. Le point B représente les points d'injection de courant implantés entre les électrodes de mesure de potentiel. La position du point d'injection par rapport à celle du doublet de mesure de potentiel détermine un coefficient géométrique K . Chaque doublet de mesure de potentiel est interrogé successivement par le dispositif automatique d'injection et de mesure piloté par ordinateur, pour une position d'injection donnée. Comme dans le cas du sondage électrique, plus la distance par rapport à MN augmente, plus le volume de terrain intéressé est important et plus la pénétration du sol augmente.

La résistivité apparente est calculée à partir des 3 termes K , ΔV et I :

$$\rho_a = K \times \Delta V / I$$

L'analyse des résultats s'effectue sur la base d'un aspect régulier des courbes d'isovaleur de la résistivité apparente dans le cas des terrains homogènes. Dès qu'une hétérogénéité du sol est rencontrée, les lignes d'isovaleur de résistivité sont déformées. Un pourcentage de **vide** élevé à l'aplomb d'un fontis se traduit par le **caractère résistant** du terrain. Au droit des cloches de fontis très développées, on observe la remontée des courbes de résistivité, voire l'existence de «**bulles**» **résistantes** proches de la surface. Une **structure creuse enterrée** se définit plutôt par un **fort contraste vertical de la résistivité** apparente. La localisation d'un soutènement de puits (structure verticale) peut ainsi être suivie en profondeur.

Avantages

Les progrès techniques réalisés sur ce type de matériel permettent de multiplier le nombre de mesures rapidement et avec une mise en oeuvre légère et discrète, donc à des coûts raisonnables. La géométrie du dispositif d'injection de courant pouvant être modulée selon la configuration du site ou la profondeur d'investigation, la méthode est adaptable à différents types d'anomalies. Les conditions météorologiques (humidité - sol détrempé) ne semblent pas influencer les mesures. En outre, cette méthode géophysique n'est pas trop perturbée par la couverture argileuse superficielle, même relativement épaisse.

Inconvénients

Les résultats se présentent sous la forme d'une coupe du terrain. L'implantation judicieuse des panneaux électriques est conditionnée par la reconnaissance préalable du site à l'aide d'autres méthodes géophysiques. Comme pour l'électromagnétisme, son utilisation est difficile dans les zones urbanisées ou industrialisées et en général lorsqu'il existe à proximité des canalisations et des lignes électriques. Au plan de la sécurité, il est utile de noter que certaines électrodes sont plantées le plus loin possible du site d'investigation et peuvent présenter un danger pour d'éventuels curieux au moment des injections de courant.

Radar géologique ou radar de surface

Le radar géologique utilise la réflexion à incidence quasi-normale des ondes électromagnétiques haute fréquence pour l'exploration superficielle des couches de terrains ou l'auscultation d'ouvrages. La méthode du radar de surface, mis à part sa profondeur d'investigation plus limitée, est comparable à la sismique réflexion.

La détection de structures (géologiques, canalisations, vides ...) s'effectue à partir de la réflexion énergétique des ondes électromagnétiques sur les interfaces entre milieux de constantes diélectriques différentes.

Une antenne émettrice, déplacée à vitesse constante le long du profil à ausculter, envoie dans le sous-sol des impulsions d'énergie de brève durée (quelques nanosecondes). Au contact d'interfaces, une partie de l'énergie est réfléchi vers le haut et captée par une antenne réceptrice. Le signal capté par l'antenne de réception est amplifié, traité pour être visualisé sur l'écran de l'unité de contrôle et enregistré sur bande magnétique.

Les résultats se présentent sous la forme de coupes temps continues en couleur (radargrammes), sur lesquelles sont portées en abscisse la distance le long du profil, et en ordonnée le temps de propagation des ondes (trajet aller-retour en nanosecondes). Chaque couleur correspond à une amplitude selon un code prédéfini.

La méthode permet de détecter et de positionner des cibles constituant des anomalies dans les terrains analysés (cavités, discontinuités, canalisations, armatures métalliques) ou de cartographier des niveaux réflecteurs.

L'interprétation des radargrammes est **essentiellement qualitative**.

Le choix des fréquences de travail détermine en partie la résolution et la profondeur d'investigation. En raison des hautes fréquences utilisées (quelques dizaines de MHz à quelques GHz correspondant à des longueurs d'onde allant de 10 cm à quelques mètres), et pour les milieux relativement peu conducteurs, cette technique remplace avantageusement la sismique réflexion classique où celle-ci ne peut être appliquée (profondeurs comprises entre 0 et 20 m).

Avantages

Le radar de surface donne satisfaction pour la détection d'infrastructures enterrées à faible profondeur, jusqu'à une vingtaine de mètres. Il permet ainsi de différencier en milieu urbain les anomalies recherchées des canalisations parasites. Le caractère continu de l'enregistrement en fait un instrument privilégié pour la détection de détail. L'interprétation qualitative des sections traitées peut donner des indications précises sur la forme et la nature des contrastes, elle demeure dans certains cas délicate et nécessite alors le regard d'un spécialiste.

Inconvénients

Le problème majeur est constitué par la perte de signature radar dans les milieux conducteurs. Ce sont les caractéristiques électriques des milieux traversés (conductivité électrique, constante diélectrique) qui déterminent la profondeur d'investigation avec la

perte d'énergie de l'impulsion électromagnétique sous forme de chaleur. Plus basse sont la conductivité électrique et la constante diélectrique des formations traversées, plus grande sera la profondeur d'investigation. Ainsi, l'utilisation du radar de surface devient aléatoire en présence d'une couche argileuse au niveau des terrains de recouvrement, même de faible épaisseur, ou lorsqu'on a affaire à des terrains aquifères très poreux, riches en solution salines.

Méthode magnétique

Le champ magnétique terrestre F est généralement défini par sa déclinaison D , son inclinaison I , ses composantes H (horizontales) et Z (verticales). L'intensité du champ magnétique, son inclinaison et sa déclinaison varient considérablement à la surface du globe terrestre. En un point donné, le champ magnétique terrestre est la résultante :

- d'un champ interne appelé champ géomagnétique que l'on peut assimiler au champ créé par un barreau aimanté placé au centre du globe ;
- d'un champ magnétique anormalique correspondant à l'écart entre le champ mesuré et le champ géomagnétique théorique. Il est créé par la répartition dans l'écorce terrestre des roches de susceptibilités magnétiques différentes. Ce champ anormalique est l'objet de la prospection magnétique ;
- d'un champ magnétique externe variable dans le temps, dont la source est l'ionosphère (hautes couches de l'atmosphère), sous l'action du rayonnement solaire.

Une anomalie magnétique est due à la présence dans le sous-sol d'un certain volume de terrains possédant une susceptibilité magnétique et/ou une aimantation rémanente différente de celle des roches encaissantes. Cette masse crée un champ magnétique local qui s'ajoute au champ terrestre.

Une station de base permet de mesurer les variations diurnes du champ magnétique liées au rythme solaire. Les mesures d'un lever sont automatiquement corrigées de ces variations diurnes par les magnétomètres de terrain à protons. Ceux-ci sont constitués d'un capteur magnétique que l'on fixe sur un harnais ou à l'extrémité d'une perche, relié à l'appareil de mesure.

La forme de l'anomalie dépend de la forme de la structure, de son pendage, de sa profondeur et de son aimantation par rapport au champ terrestre. Cette diversité de formes peut poser des problèmes d'interprétation.

Avantages

La méthode magnétique est une méthode légère, rapide, facile à mettre en oeuvre et peu coûteuse. Dans le cas de recherche d'anciennes infrastructures minières (puits, galeries avec soutènement métalliques ou rails...) présentant des contrastes de magnétisme, cette technique peut devenir efficace et dégrossir rapidement une grande surface de terrain avant de se focaliser sur les zones anormaliques avec des méthodes plus fines telles que le radar géologique.

Inconvénients

Cette méthode est sensible aux parasites industriels. Difficile à mettre en oeuvre en site urbain, elle peut s'appliquer plus facilement sur d'anciennes friches industrielles.

Sismique réflexion très haute résolution

Les méthodes de prospection sismique reposent sur l'examen de la propagation des ondes dans le sous-sol, à la suite d'un ébranlement provoqué à la surface du sol par explosion, vibration, frappe d'une masse sur une plaque... Elles analysent le temps mis par les ondes longitudinales pour se propager entre la surface et une série de réflecteurs, caractérisés par leur contraste d'impédance acoustique (vitesse sismique et/ou densité). Les profondeurs sont liées aux temps de trajet (coupes temps).

La sismique réflexion très haute-résolution utilise les hautes fréquences pour investiguer les tranches de terrains superficielles (0 à 50 m).

Les réflexions au niveau du toit de cavités interfèrent avec les signaux provenant des strates géologiques en provoquant l'apparition d'anomalies dans les coupes sismiques telles que affaiblissement/augmentation du niveau des signaux, modifications spectrales, phénomène de résonance, réfraction etc... Les vieux travaux constituent en outre un obstacle à la pénétration des ondes vers les couches géologiques plus profondes, d'où un effet de masque de celles-ci.

Avantages

Bonne précision potentielle dans la localisation des vides, notamment dans le cas d'exploitation par chambres et piliers, entre 5 et 50 m de profondeur.

Inconvénients

La technique s'applique au cas de structures géologiques peu complexes (pendages inférieurs à 50°, plis suffisamment amples, compartiments géologiques suffisamment larges), avec de bons contrastes d'impédance acoustique (vitesse et/ou densité des terrains), au niveau de la cible à étudier, permettant d'obtenir de bons marqueurs sismiques. Les terrains de surface doivent également bien propager les ondes sismiques haute fréquence.

3. Mise en oeuvre d'une campagne géophysique de recherche de vides miniers

Les méthodes géophysiques ne peuvent être mises en oeuvre sans une connaissance, même partielle, du type d'anomalie recherchée et de son contexte (type d'anomalie, contexte minier, environnement géologique, configuration du site...). Les performances des différentes méthodes géophysiques utilisables sont par ailleurs fonction de la maille de travail (observation) adoptée. Le maillage doit avant tout être adapté au type de reconnaissance et à la dimension des vides recherchés.

Si les méthodes géophysiques retenues constituent individuellement des outils intéressants pour localiser les vides miniers ou leurs effets en subsurface, la combinaison de plusieurs techniques permet généralement de cerner de façon plus fiable l'ampleur des zones anomaliques.

Une prospection systématique de la couverture superficielle par une technique simple et rapidement exploitable (sur le site, dans les heures qui suivent) constitue une première étape indispensable pour implanter et adapter judicieusement les principaux outils géophysiques sélectionnés pour l'étude.

En l'absence de contraintes liées à l'environnement (canalisations, lignes électriques), **l'électromagnétisme** sol à émetteur mobile paraît être la première technique à mettre en oeuvre pour détecter les contrastes existants dans le sous-sol. En milieu urbain ou industriel, où le risque d'effondrement est plus préoccupant, cette prospection préalable électromagnétique est quasiment impossible.

Si le terrain en surface est conducteur (peu ou pas de remblais), il peut être intéressant d'utiliser le **radar géologique** en première approche pour localiser d'éventuels obstacles, telles les canalisations enterrées, ou même pour détecter les anomalies proches de la surface (< 5 m).

Pour caractériser de manière a priori plus efficace la présence des vides, la seule technique éprouvée reste la **microgravimétrie**. Elle se pratique en première approche sous la forme d'un cheminement en "chevelu" pour délimiter les zones de contraste en densité puis par un resserrage de la maille. Les variations relatives de l'anomalie gravimétrique constituent un élément objectif pour apprécier le risque à terme. Il est préférable dans ce cas, de confirmer l'existence du risque par quelques mesures gravimétriques localisées avant de prévoir une campagne de sondages. L'utilisation de cette méthode n'est toutefois possible que pour la recherche de cavités de plusieurs mètres cubes.

Par la suite, en fonction des contraintes et du problème défini, d'autres méthodes géophysiques plus spécialisées peuvent être combinées avec un maximum d'efficacité, comme les **méthodes électriques** ou **infrarouges**. Pour un **fontis**, ces techniques vont marquer des contrastes électriques ou thermiques plus ou moins évidents selon le développement et la proximité de la montée de voûte. Elles sont également susceptibles d'apporter des informations supplémentaires sur la configuration générale du site (état et épaisseur du recouvrement, limites des secteurs sous-minés).

La **sismique haute résolution**, si l'horizon exploité est localisé dans un horizon stratigraphique continu et régulier, peu penté (exploitations par chambres et piliers), peut dans ce cas permettre d'effectuer une bonne cartographie de secteurs sous-minés dont on aurait perdu toute trace dans les archives.

Pour les **anciens puits de mine**, la détection géophysique doit permettre la localisation aussi exacte que possible de l'ouvrage dans un environnement de friche industrielle abandonnée. A ce stade, il est important de **définir une image du sous-sol en**

profondeur pour mettre en évidence des contrastes de structure verticaux. Ceux-ci correspondent au soutènement du puits et aux remblais dans le puits. Les méthodes dérivées du sondage électrique sont alors bien adaptées lorsque leur mise en oeuvre est possible. L'état de la fermeture du puits peut passer ensuite par l'utilisation de méthodes plus qualitatives comme le radar géologique, mais dont l'interprétation reste délicate.

Le tableau ci-après, indique le pas de mesure minimum à respecter pour la détection d'anomalies "du second ordre", limitées en extension et très proches de la surface.

Maillage minimum à considérer par méthodes

<i>Méthodes testées</i>	<i>Reconnaissance</i>	<i>Délimitation précise</i>
Électromagnétisme	2 à 4 m - (EM31) 4 m - (EM34)	2 m (EM31)
Gravimétrie	Cheminement (10 m)	2 à 4 m
Infrarouge	/	1 m
Panneau électrique	4 m	2 m
radar de surface	continu	continu

L'interprétation des mesures est liée à l'observation des similitudes ou des différences de valeurs des résultats enregistrés.

La mise en évidence d'une instabilité superficielle se traduit pour chaque méthode par des paramètres physiques spécifiques qui peuvent évoluer différemment selon le type d'anomalie recherchée.

4. Unité d'exploitation Provence : étude du carreau du puits du Soleil, exploitations de la Bouilladisse, étude du puits Sainte-Marie à Trets

4.1 CARREAU DU Puits DU SOLEIL

Les abords du carreau du puits du Soleil (figure 1) appartiennent à un particulier qui envisage de lotir ce terrain (2 000 m²) et qui a déposé une demande de permis de construire. Ce site a été retenu pour effectuer un test de localisation des galeries techniques et canalisations aux abords du puits, à moins d'une dizaine de mètres de profondeur.

Les terrains à l'affleurement sont constitués des marno-calcaires fuvéliens, pentés vers le Sud, sous un recouvrement de quelques décimètres de remblais fins schisto-charbonneux ou de remblais gréseux grossiers.

Vu la faible profondeur des galeries recherchée, nous avons proposé d'utiliser des méthodes légères de type radar géologique (modèle SIR 10 de GSSI) couplée à une investigation électromagnétique EM31.

Reconnaissance par radar de surface

Les profils (espacés de 5 m, stations repères tous les 2 m) ont été réalisés à l'aide de 2 antennes, une de 500 MHz pour obtenir une meilleure définition des premiers mètres de terrains, une de 300 MHz pour une investigation plus profonde (10 à 15 m).

L'analyse des profils a permis de repérer sur les radargrammes les galeries et canalisations recherchées par les hyperboles renversées à forts réflecteurs avec échos successifs sous le toit de celles-ci (figures 2 et 3).

L'interprétation des 6 profils a permis de mettre en évidence :

- une galerie orientée Nord-Est/Sud-Ouest allant des abords du puits jusqu'à une zone dite «ancienne chaufferie», non métallique, visible sur le profil 5. Cette galerie fait 21 m entre le profil 1 et le profil 5 ;
- une canalisation de direction nord-ouest/sud-est de 35 m de long entre P1 et P6, visible sur tous les profils. Celle-ci s'incurve à 2 m de la grille d'entrée du puits.

Deux anomalies hyperboliques sont constatées sur P2 et P3, sans continuité sur les autres profils.

Des sondages à la pelle mécanique ont permis de confirmer l'existence de la galerie, très proche de la surface, visitable sur 35 mètres de longueur (galerie voûtée, maçonnée, 1 m de haut pour 1,35 m de large, voûte de quelques décimètres à un mètre de profondeur). La canalisation, en béton non armé, a également été repérée.

Reconnaissance par méthode électromagnétique EM31

Les profils étudiés sont identiques à ceux du radar et le pas de mesure le même, soit 2 m.

Seule une anomalie électromagnétique d'axe Nord-Sud correspondant vraisemblablement à une galerie profonde de plus de 5 m, avec éléments métalliques, est clairement mise en évidence par la carte de conductivité obtenue (figure 4). La galerie repérée par radar n'apparaît pas clairement sur ce document (elle semble se dessiner en jaune), la canalisation pas du tout (en béton non armé et de faible section elle ne peut être détectée en conductivité).

Conclusions

Cet essai a permis de localiser correctement par radar géologique une galerie et une canalisation à moins de 1 m de profondeur dans un encaissant marno-calcaire. Une galerie plus profonde (supérieure à 5 m), a pu être mise en évidence par électromagnétisme EM31 grâce aux éléments métalliques présents.

4.2 ETUDE DU Puits STE MARIE A TRETS

Un test réalisé sur l'ancien puits SAINTE-MARIE de la concession de TRETS a permis d'obtenir la signature caractéristique d'un puits dallé remblayé (figure 5). L'armature de la dalle effectuée avec un assemblage de rails ferroviaires est particulièrement mise en évidence sur la section radar.

5. Test de la méthode radar de surface pour la recherche d'anciens puits miniers dans la région de Saint-Chamond (Loire)

Un test de localisation de six têtes d'anciens puits datant du XIX^{ème} siècle, localisés à quelques dizaines de mètres près d'après de vieux plans, a été entrepris dans le bassin houiller de la Loire. Le mode de traitement de ces puits est inconnu (soit remblai total, soit remblai + dalle béton armée, soit dalle sur vide).

Les environnements de ces différents puits sont les suivants :

- Trois puits situés dans une prairie, en fond de vallon, près de SAINT-CHAMOND. Il s'agit des puits SAINTE-PHROSE, BARRIER et BRUN.
- Deux puits situés en environnement urbain, à SAINT-CHAMOND :
 - le puits FAYARD se trouve sous un vaste parking, au niveau d'une ancienne plate-forme remblayée (emplacement d'une usine récemment démolie),
 - le puits CHAZET se trouve en bordure d'une route nationale et de bâtiments au centre ville.

Le dernier puits (puits DARNON) se trouve en campagne aux abords d'une maison (jardin, cour...), avec plusieurs localisations possibles autour de cette maison.

Une grille de mesure a été implantée autour des puits présumés, après une première recherche aléatoire au radar de surface et à l'EM31. La maille retenue a été de 2 x 2 m ou 1 x 1 m selon les cas.

Deux types d'antennes radar ont été utilisées, une petite antenne de 500 MHz pour une approche rapide de subsurface (pénétration de 0 à 3 m), une antenne de 100 MHz permettant une investigation plus profonde, de l'ordre de 15 m. Tous les profils radars ont été enregistré sur cassette 8 mm afin de permettre un traitement différé en laboratoire.

5.1 PUIITS BARRIER et SAINT-ROCH

Ces 2 puits sont localisés dans le secteur de LA CHAPELLE DU FAY (figure 6), sur une prairie en pente.

Quatre profils de 60 m de longueur, équidistants de 2 m, ont été implantés dans l'axe des 2 têtes de puits supposées, complété par 10 profils transversaux de 16 m de longueur (figure 7).

On devine tout juste l'emplacement probable du puits BARRIER dans le pré (légère dépression circulaire dans la pente avec une borne au voisinage).

Les mesures ont été effectuées avec la seule antenne 100 MHz. Les sections radar couvrent une section temps de 300 ns (trajet aller-retour), soit une profondeur moyenne d'investigation de 15 m (20 ns/m). Les profils 32, 33 et 34 font ressortir des structures verticales pouvant correspondre aux puits recherchés, le profil 32 est le plus représentatif car a priori dans l'axe des puits probables.

Trois zones présentent de telles structures verticales : la plus au Nord correspond à l'implantation du puits ST ROCH entre 37 et 41 m (figure 8), celle au centre correspond à l'implantation du puits BARRIER (notée BARRIER 2), entre 15 et 20 m, avec des réflexions sur les parements bien visibles sur le profil longitudinal (figure 9) et transversal (figure 10). La troisième, plus au Sud (notée BARRIER 1), entre 3 et 6 m, ne correspond à aucun emplacement de puits connu, en limite de clôture du pré (figure 11).

5.2 PUIITS STE PHOROSE

Situé dans la même prairie que les 2 précédents, nous n'avons pas d'implantation précise de ce puits au préalable. Une grille de mesure de 16 x 16 m a été implantée sur un secteur où l'on devinait une zone anciennement remblayée, en légère dépression. Neuf profils croisés distants de 2 m ont été testés avec les antennes de 500 puis 100 MHz (planche photo 1), une carte de conductibilité électrique a été dressée sur ce même maillage avec un appareil électromagnétique portable EM31.

La carte de conductivité présente une structure linéaire faiblement conductrice recoupant diagonalement la surface investiguée (figure 12). Cette anomalie correspond probablement à une canalisation ou galerie de mine présentant des ferrailles. On la retrouve systématiquement sur tous les profils radar.

A la lecture des différents profils, on retrouve 2 secteurs présentant une signature pouvant correspondre à un ancien puits, sur les profils Ouest-Est n° 24 au coeur de la zone de recherche (figure 13 et 14 : même section avec 2 différents choix de couleurs) et

sur le profil 19 à l'extrémité nord de la grille (figure 15). La signature du profil 19 correspond davantage à une structure de puits maçonné, couvert par une dalle et probablement remblayé vu l'intensité des réflexions au coeur du puits.

Les indices de surface associés à l'anomalie radar centrale du profil 24, interprétée a priori comme correspondant au puits recherché, nous ont donc induit en erreur quand au positionnement de la grille de recherche. Celle-ci aurait donc dû être davantage élargie.

5.3 PUIITS CHAZET

Situé en milieu urbain à SAINT-CHAMOND, près de la route nationale, l'implantation topographique effectuée par les géomètres le positionne face au portail d'entrée et à un escalier de la Maison des Arts .

Une série de profils parallèles à la route nationale (23 m de long) avec des profils transversaux longeant la rue d'accès au parking du puits FAYARD ont été étudiés (figures 16 et 17).

Aucune structure correspondant à un puits de mine n'a été identifiée, probablement du fait que son implantation réelle est trop proche du portail et des escaliers, empêchant son repérage avec l'antenne 100 MHz, trop volumineuse.

Un conduit de section importante est par contre bien identifié sur les différentes section radar, à 2 m le long du trottoir (figure 18).

5.4 PUIITS FAYARD

Le puits FAYARD est situé sur un parking récemment réalisé à l'emplacement d'une ancienne usine démolie, non loin du secteur du puits CHAZET (figure 19).

Quarante neuf profils croisés ont été implantés autour du point de localisation possible repéré par les géomètres. Les 2 antennes de 500 et 100 MHz ont été utilisées. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la petite antenne. Deux réflecteurs horizontaux bien marqués sont visibles sur l'ensemble du secteur, vers 3 à 4 m de profondeur. Deux canalisations ont été repérées sur la zone (profil 29, figure 20) ainsi que des réflecteurs horizontaux vers 1 m de profondeur. Des stratifications avec un pendage de l'ordre de 45° sont visibles sur les profils 40, 41, 42 et 43 (profil 41, figure 21). On ne remarque pas de signature correspondant clairement à un puits. Un signal avec une structure en double voûte visible sur les profils 40 et 41 pourrait correspondre à la zone du puits recherché, à 2 mètres environ du point implanté (figure 21).

5.5 PUIITS DARNON

Ce puits est situé au lieu dit « Au Parterre », près de la route menant à CHAVANNE, à proximité d'une petite maison qui doit faire l'objet d'une démolition prochaine. Plusieurs implantations possibles avaient été initialement fournies par le service géomètre des Houillères autour de la maison (figure 22). Les topographes ont finalement retenu une seule implantation de la zone de recherche, dans le jardin potager, rendant

l'opération impossible sans dégradation. Une recherche avec la petite antenne sur le sentier entre la maison et le potager n'a pas repéré d'anomalie significative.

Les premières indications laissaient entendre une possible localisation devant la cour de la maison. Cette dernière est bordée par un pré (parcelle 55) avec des traces de remblais houillers circulaires en légère dépression évoquant la présence possible d'un puits remblayé.

Une série de mesures sur une grille de 12 x 12 m avec profils tous les 2 m a été réalisée sur cet indice.

Les profils 63, 64 et 68 (figures 21, 22) font ressortir des anomalies qui correspondent à un signal de puits, notamment sur le profil 68 où l'on remarque des échos verticaux susceptibles de figurer le cuvelage du puits. Le puits DARNON se situe donc avec une bonne probabilité à cet emplacement.

5.6 CONCLUSIONS

La méthode de recherche d'anciens puits miniers avec la technique du radar de surface a démontré son efficacité dans la majorité des cas présentés. La méthode électromagnétique EM31 reste un outil complémentaire pouvant dans certains cas guider utilement les recherches.

Les signatures obtenues sont très correctes, principalement sur les anciennes têtes de puits affleurant en prairies. Dans la zone de LA CHAPELLE DU FAY, les puits SAINTE-PHROSE, BARRIER et SAINT-ROCH ont été localisés avec une bonne certitude, avec même une signature correspondant à un probable puits supplémentaire (BARRIER I). Le puits DARNON a également été repéré avec une bonne probabilité.

Les recherches sur les 2 puits en zone urbaine sont moins fructueuses. Le puits CHAZET semble non repérable avec le matériel car trop proche d'un mur (problème d'encombrement de l'antenne 100 MHz). La signature interprétée comme étant celle de l'écho radar du puits Fayard reste la moins probante de l'ensemble des échos obtenus dans le cadre de ce test.

La stratégie de recherche autour d'un point d'implantation connu approximativement doit s'opérer dans un premier temps de façon suffisamment large, sans maillage ni enregistrement systématique du signal de manière à balayer toute la zone. Si une anomalie flagrante ressort sur l'écran de contrôle on doit alors mettre en place une grille de mesure suffisamment fine (2 x 2 m) autour de cette cible et enregistrer alors tous les profils pour pouvoir les restituer et les analyser.